Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 103 (2011)
Heft: 4

Artikel: Lokale Klimaszenarien für die Klimaimpaktforschung in der Schweiz
Autor: Bosshard, Thomas / Kotlarski, Sven / Schär, Christoph
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941819

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 06.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Flugverkehr, Überblick über andere Energieperspektiven, 301 S., Bern.
BFE (2011): Faktenblatt, Energieperspektiven 2050, Abschätzung des Ausbaupotenzials der Wasserkraftnutzung unter neuen Rahmenbedingungen.
Bosshard, T. (2011): Hydrological climate-impact modeling in the Rhine catchment down to Cologne. Diss. ETH 19861. In press.
Bosshard, T., Kotlarski, S., Ewen, T., and *Schär, C.* (2011): Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal, Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 2777–2788, doi: 10.5194/hess-15-2777-2011.
CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp. ISBN 978-3-033-03065-7.
Christensen, J.H., Carter, T., Giorgi, F. (2002): PRUDENCE employs new methods to assess European climate change. In: EOS, 82, 147, 2002.
Fachberichte (2011): Fachberichte zum Projekt Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung. Siehe: http://www.hydrologie.unibe.ch/projekte/ccwasserkraft.html.
Hänggi, P. und *Plattner, C.* (2009): Projekt Klimaänderung und Wasserkraftnutzung: Schlussbericht der Vorstudie. Hrsg. Kompetenznetzwerk Wasser im Berggebiet. Bern, Davos.
Hänggi, P. (2011): Auswirkungen der hydroklimatischen Variabilität auf die Wasserkraftnutzung in der Schweiz. Inauguraldissertation der Philosophischen-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, Bern.
Horton, P., Schaefli, B., Mezghani, A., Hingray, B., Musy, A. (2005): Prediction of climate change impacts on Alpine discharge regimes under A2 and B2 SRES emission scenarios for two future time periods. Bundesamt für Energie, Energiewirtschaftliche Grundlagen, Bern, 2005.
IPPC (2008): Klimaänderung 2007, Synthesebericht, Berlin.
Magnusson, J., Farinotti, D., Jonas, T., Bavay, M. (2011): Quantitative evaluation of different hydrological modeling approaches in a partly glacierized Swiss watershed. Hydrol. Process. 25: 2071–2084.
Piot, M. (2005): Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Wasserkraftproduktion in der Schweiz. «Wasser Energie Luft», Heft 11/12, pp. 365–367. Baden, 2005.
SGHL und *CHy* (2011): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung – Synthesebericht. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 18, 28. S., Bern. ISBN 978-3-033-02970-5
Van der Linden , P. and *Mitchell, J.F.B.* (2009): ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project, Met Office Hadley Center, Exeter, UK, 160 pp.
Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., Weingartner, R. (2009): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. Environmental Modelling & Software 24(10): 1209–1222.

Anschrift der Verfasser
Bruno Schädler, Rolf Weingartner
Geographisches Institut der Universität Bern
Gruppe für Hydrologie
Hallerstr. 12, CH-3012 Bern
bruno.schaedler@giub.unibe.ch
rolf.weingartner@giub.unibe.ch

Massimiliano Zappa
Eidg. Forschungsanstalt WSL
Forschungseinheit «Gebirgshydrologie und Wildbäche»
Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf
massimiliano.zappa@wsl.ch

Lokale Klimaszenarien für die Klimaimpaktforschung in der Schweiz

Thomas Bosshard, Sven Kotlarski, Christoph Schär

1. Einleitung

Der globale Klimawandel ist eine nicht mehr zu bestreitende Tatsache und zeigt sich bereits heute in einer Vielzahl an Indikatoren. Hierzu zählen nicht nur langjährige Temperaturmessreihen, welche einen eindeutigen Erwärmungstrend auf globaler Skala offenbaren, sondern auch der weltweit beobachtete Rückzug von Gebirgsgletschern, der Anstieg des Meeresspiegels oder der Rückgang der Schneebedeckung in der Nordhemisphäre. Nach Einschätzung des Weltklimarates (IPCC, 2007) ist der anthropogene Ausstoss von Treibhausgasen für den Grossteil der seit den 1950er-Jahren beobachteten Erwärmung verantwortlich. Für das 21. Jahrhundert wird generell mit einem weiterhin ungebremsten Temperaturanstieg gerechnet, wobei die Intensität dieses Anstiegs stark von unseren zukünftigen Treibhausgasemissionen abhängen wird. Dabei werden sich die in den kommenden Jahrzehnten erwarteten klimatischen Veränderungen nicht auf die Temperatur beschränken sondern auch weitere Grössen betreffen, insbesondere auch Komponenten des hydrologischen Kreislaufs wie Niederschlag und Evapotranspiration. Als Folge dessen ist mit entsprechenden Konsequenzen auch für den Bodenwasserhaushalt, die Schneebedeckung und das Abflussgeschehen zu rechnen. Bereits der Bericht des OcCC zur Klimazukunft der Schweiz (OcCC und ProClim, 2007) gibt einen umfassenden Überblick über die zu erwartenden wasserwirtschaftlichen Konsequenzen des Klimawandels und mögliche Anpassungsmassnahmen.

Für detaillierte, quantitative Analysen zum Einfluss des Klimawandels auf den Wasserkreislauf und insbesondere das Abflussgeschehen und hydrologische Speicherfüllungen bedarf es Informationen zur erwarteten Klimaveränderung mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung. Solche Szenarien können in einem zweiten Schritt als Input für hydrologische Modellsysteme verwendet werden, um zu einer Abschätzung der zukünftigen Entwicklung hydrologischer Komponenten zu gelangen. Eine entscheidende Bedeutung kommt hierbei der Quantifikation der Modellunsicherheiten auf allen involvierten Ebenen zu. Dies gilt in besonderem Masse für die verwendeten Klimaszenarien, die am Beginn der gesamten Modellkette stehen. Während die Klimaszenarien des OcCC Berichtes (OcCC und ProClim, 2007) noch auf Ergebnissen des EU-Pro-

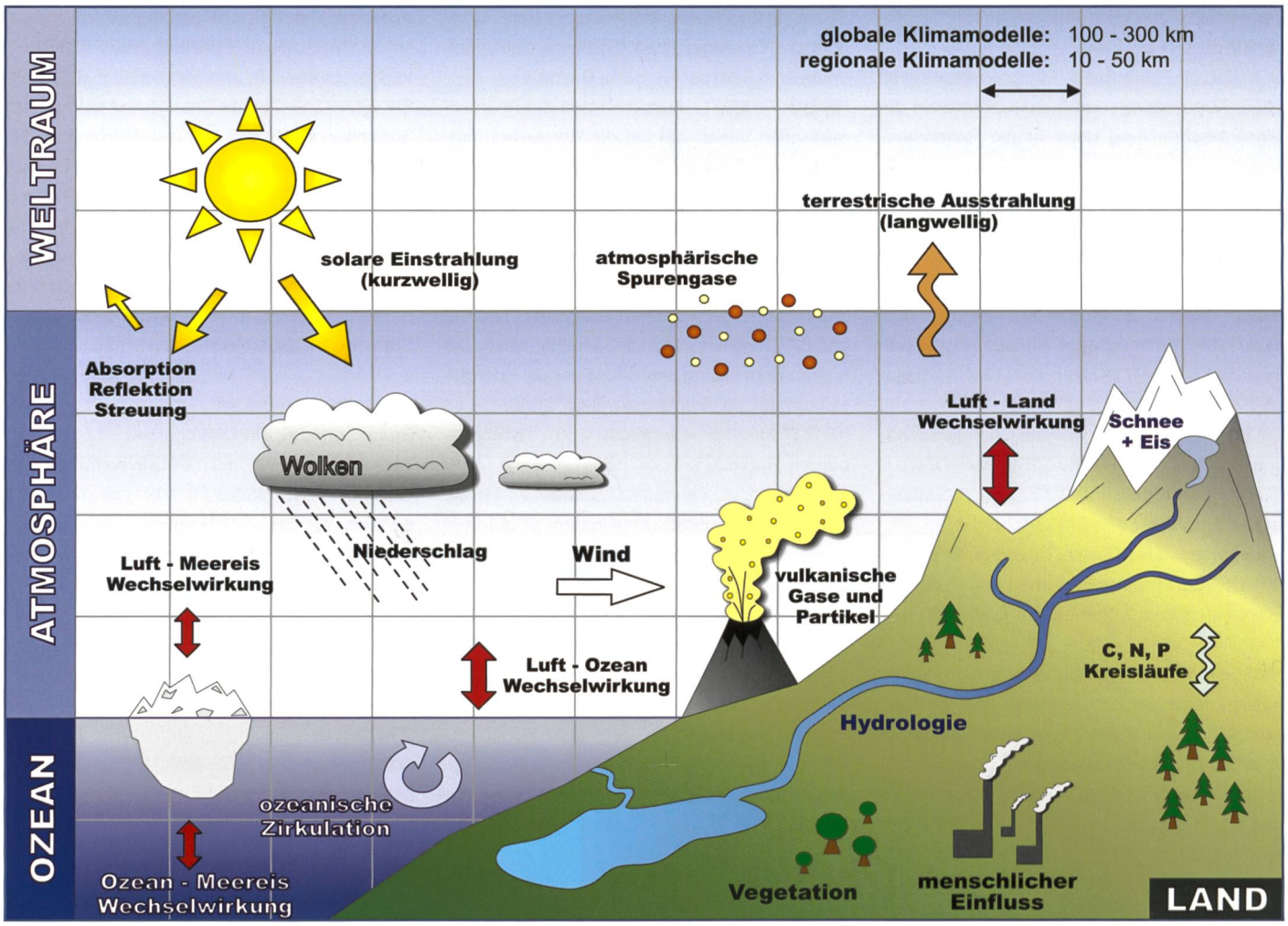

Bild 1. Komponenten des Klimasystems und ihre Darstellung in globalen und regionalen Klimamodellen.

jektes PRUDENCE (Christensen und Christensen, 2007) basierten, wurden durch das Nachfolgeprojekt ENSEMBLES (van der Linden und Mitchell, 2009) aktualisierte regionale Klimaszenarien für Europa mit verbesserten Modellen und einer höheren räumlichen Auflösung zur Verfügung gestellt. Diese Szenarien entsprechen dem neuesten Stand der regionalen Klimamodellierung und erlauben eine detaillierte Abschätzung der Modellunsicherheiten.

Die ENSEMBLES-Szenarien wurden im Rahmen der CH2011 Initiative (CH2011, 2011) für die Schweiz aufbereitet und – in einer Vorabversion – in den beiden Projekten Klimaänderung und Wasserkraftnutzung (swisselectric/Bundesamt für Energie) und CCHydro (Bundesamt für Umwelt) bereits zur Abschätzung des Einflusses des Klimawandels auf verschiedene hydrologische Systeme verwendet. Der folgende Artikel gibt einen Überblick über Datengrundlage, Methodik, Ergebnisse sowie Einschränkungen der neu erstellten lokalen Klimaszenarien für das Gebiet der Schweiz.

Institut	GCM	RCM
ETHZ	HadCM3Q0	CLM
HC	HadCM3Q0	HadRM3Q0
SMHI	HadCM3Q3	RCA
DMI	ECHAM5	HIRHAM
KNMI	ECHAM5	RACMO
ICTP	ECHAM5	REGCM
MPI	ECHAM5	REMO
SMHI	ECHAM5	RCA
CNRM	ARPEGE	ALADIN
SMHI	BCM	RCA

Tabelle 1. Übersicht über die zehn verwendeten GCM-RCM Modellketten des ENSEMBLES-Projektes.

2. Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Studie war es, die aktuellsten regionalen Klimaszenarien des ENSEMBLES-Projektes für hydrologische Klimaimpaktforschung in der Schweiz aufzubereiten. Im Fokus standen dabei die beiden Variabeln bodennahe Lufttemperatur (T) und Niederschlag (P). Ein besonderer Augenmerk galt der Schnittstelle zwischen Klima- und Impaktmodellen und ihrer Anwenderfreundlichkeit: Die entwickelten Produkte sollten einerseits einfach zu handhaben und verständlich sein, andererseits alle wesentlichen Aspekte des regionalen Klimawandels inklusive der Unsicherheiten regionaler Klimaprojektionen abbilden. Letzteres wurde durch die Auswertung von insgesamt 10 unterschiedlichen Klimamodellketten sichergestellt (s. Kapitel 3.1). Hinsichtlich der relevanten Zeitskalen sollten sowohl Abschätzungen für die nahe (Mitte des 21. Jahrhunderts) als auch für die fernere Zukunft (Ende des 21. Jahrhunderts) erfolgen. Dementsprechend wurden die beiden 30-jährigen Zukunftsperioden 2021–2050 und 2070–2099 betrachtet, jeweils relativ zur aktuellen Referenzperiode 1980–2009. Je nach Anwendungsgebiet der Klimasze-

narien haben beide Perioden eine unterschiedliche Relevanz.

3. Datengrundlage und Methoden

3.1 Globale und regionale Klimamodellierung

Globale Klimamodelle (GCMs), vor allem die neueste Generation gekoppelter Atmosphären-Ozean-Zirkulationsmodelle, erlauben die Abschätzung des Einflusses anthropogener Treibhausgasemissionen auf das Klima der Erde auf Grundlage physikalischer Gesetzmässigkeiten. Alle relevanten Komponenten des globalen Klimasystems inklusive ihrer Wechselwirkungen sind in diesen Modellen berücksichtigt *(Bild 1)*. Als Vorgabe zur Berechnung des zukünftigen Klimas wird u.a. eine Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen beruhend auf sogenannten Emissionsszenarien benötigt. Bedingt durch den hohen Rechenaufwand der Zirkulationsmodelle liegt die räumliche Auflösung globaler Klimaszenarien jedoch im Bereich von 100–300 km, und damit jenseits der für viele Impaktstudien relevanten Grössenordnung. Hier setzen regionale Klimamodelle (RCMs) an. Sie stellen das wichtigste Werkzeug dar, um die grob aufgelösten Informationen globaler Klimamodelle auf die regionale Skala herunterzubrechen und Klimaänderungsszenarien mit wesentlich höherer räumlicher Auflösung zu erstellen. Ähnlich wie globale Zirkulationsmodelle beschreiben RCMs die Vorgänge innerhalb der verschiedenen Komponenten des Klimasystems sowie die Wechselwirkungen untereinander auf Grundlage physikalischer Prinzipien. Im Unterschied zu Globalmodellen wird hierbei jedoch nicht der gesamte Globus sondern nur eine bestimmte Region, z.B. Europa, betrachtet *(Bild 2)*. Dies ermöglicht eine deutlich höhere räumliche Auflösung von derzeit ca. 10–50 km. Dieser Auflösungssprung ist verbunden mit einer besseren Beschreibung der regionalen Variabilität von Klimaparametern, was vor allem in einem topographisch stark strukturierten Gelände wie den Alpen unerlässlich ist. Am Rande des regionalen Modellgebietes benötigt ein RCM Informationen über die grossskaligen Eigenschaften der atmosphärischen Strömung, die ihrerseits von globalen Klimamodellen bereitgestellt werden. Man spricht von einer sogenannten Nestung, d.h. ein RCM wird in die Ergebnisse eines globalen Klimamodells eingebettet und übernimmt am Rande des Modellgebietes die Informationen dieses antreibenden Modells *(Bild 2)*. Die dargestellte Methodik wird auch als dynamisches Downscaling, die Kombination eines GCMs mit einem RCM als Modellkette bezeichnet.

Aufgrund unterschiedlicher Modellformulierungen müssen sich die Ergebnisse verschiedener regionaler Klimamodelle selbst bei identischem antreibenden GCM nicht exakt entsprechen. Vielmehr zeigt sich in Modellvergleichsstudien, dass einzelne Modelle mit ganz unterschiedlichen, individuellen Fehlercharakteristiken behaftet sein können (z.B. Suklitsch et al., 2010). Die unterschiedlichen Fehlereigenschaften einzelner RCM's können sich auch auf die simulierten Klimaänderungssignale auswirken. Diese Modellunsicherheit wird noch vergrössert, wenn verschiedene GCM's als Randantrieb verwendet und/oder unterschiedliche Emissionsszenarien vorausgesetzt werden. Eine weitere Unsicherheitsquelle ist die natürliche Klimavariabilität, die durch eine einzelne regionale Klimasimulation nicht adäquat dargestellt werden kann. Aus den genannten Gründen ist es wichtig, eine möglichst grosse Anzahl regionaler Klimasimulationen zu betrachten, um Unsicherheitsbereiche eingrenzen und quantifizieren zu können. Die regionalen Klimasimulationen des ENSEMBLES-Projektes stellen diesbezüglich die umfangreichste und eine weltweit einzigartige Datenbasis dar. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden insgesamt 10 regionale Klimasimulationen des ENSEMBLES-Projektes (siehe *Tabelle 1*) für die Schweiz mit einem auf die Abbildung der Jahresganges optimierten statistischen Verfahren (siehe Kapitel 3.2) aufbereitet und den Projektpartnern in Kooperation mit dem Center for Climate Systems

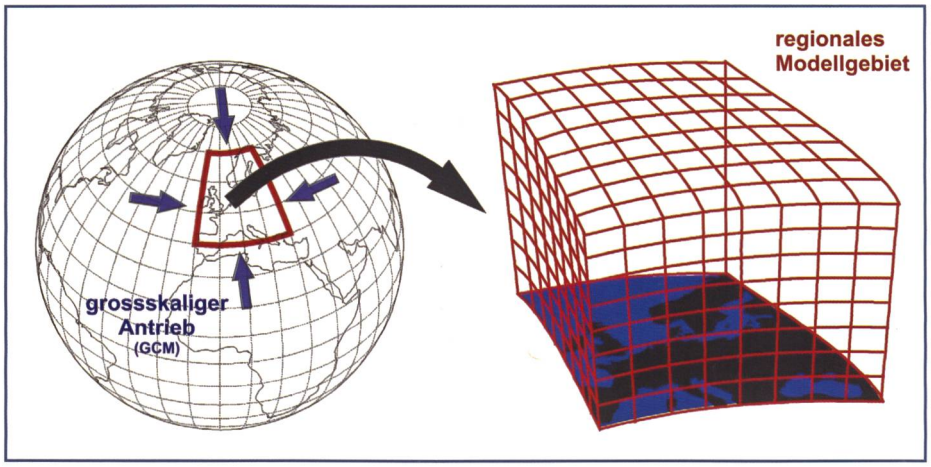

Bild 2. Prinzip der Modellnestung: Ein regionales Klimamodell (rot) wird in die grob aufgelösten Informationen eines Globalmodells (blau) eingebettet und berechnet das Klima in einem begrenzten Modellgebiet (z.B. Europa) mit höherer räumlicher Auflösung.

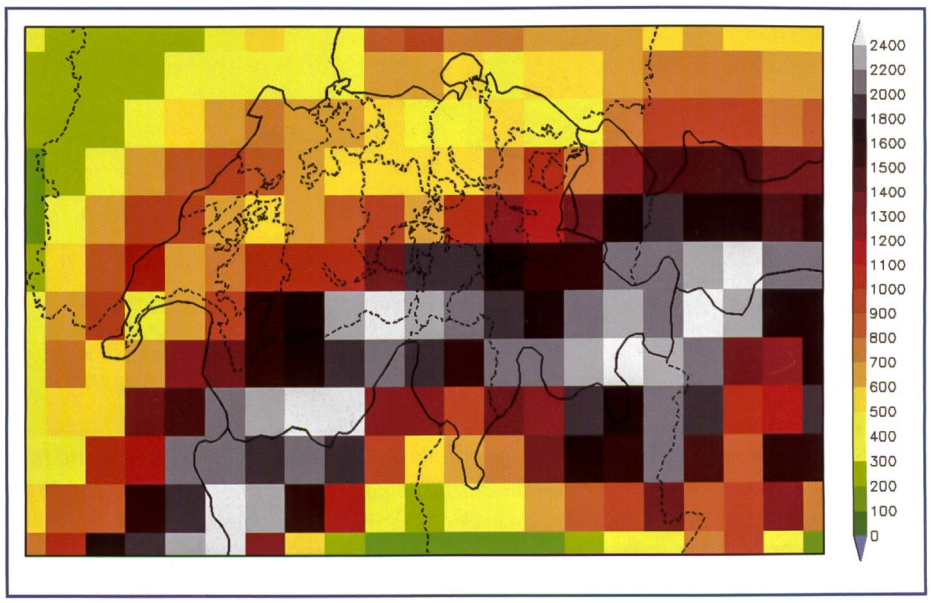

Bild 3. Topographie des regionalen Klimamodells CLM [m ü. NN.] für das Gebiet der Schweiz in 25 km Auflösung.

Modelling (C2SM) zur Verfügung gestellt. Allen verwendeten Regionalsimulationen liegt das SRES A1B Emissionsszenario zugrunde (Nakicenovic et al. 2000). Die räumliche Auflösung der RCMs betrug 25 km mit einem Modellgebiet, das den gesamten europäischen Kontinent überdeckt. Diese Auflösung erlaubt eine detailreiche Darstellung der räumlichen Variabilität von Lufttemperatur und Niederschlag und ihrer physiographischen Einflussfaktoren (Topographie, Land-Meer-Kontrast, Oberflächenbedeckung, usw.). Dennoch stösst die räumliche Genauigkeit der Modelle im Alpenraum offensichtlich an ihre Grenzen. Zur Veranschaulichung zeigt *Bild 3* die Modelltopographie des RCM CLM in 25 km Auflösung über der Schweiz. Deutlich sind der Alpenbogen, der Schweizer Jura sowie die tiefergelegenen Regionen des Mittellandes zu erkennen. Jedoch sind insbesondere im hochalpinen Raum wichtige topographische Strukturen wie z.B. des Rhonetal oder das Engadin nicht abgebildet. Die Aussagefähigkeit der regionalen Klimamodelle hinsichtlich kleinräumiger klimatischer Veränderungen in alpinem Gelände ist dadurch offensichtlich begrenzt.

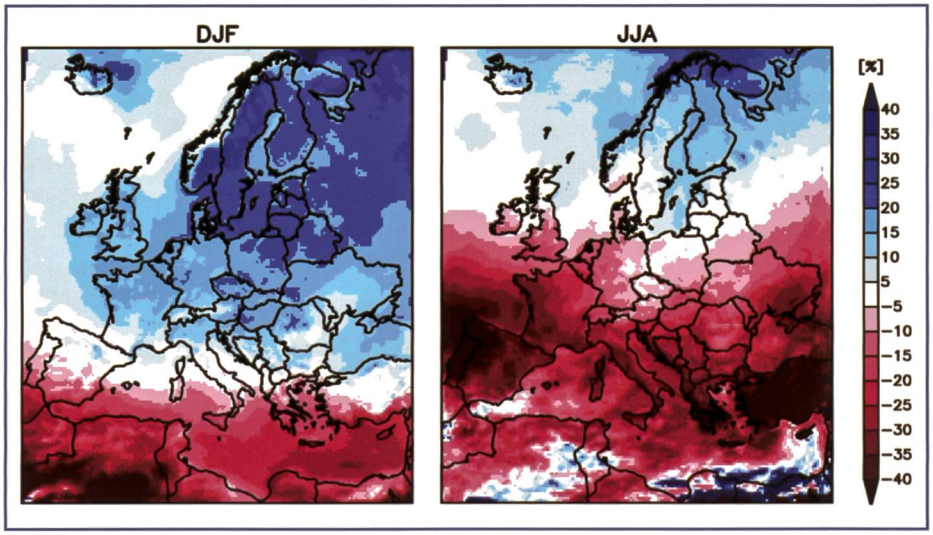

Bild 4. Ensemblemittel der grossräumigen Muster der saisonalen (Winter: DJF, Sommer: JJA) Niederschlagsveränderung für 2070–2099 relativ zu 1971–2000.

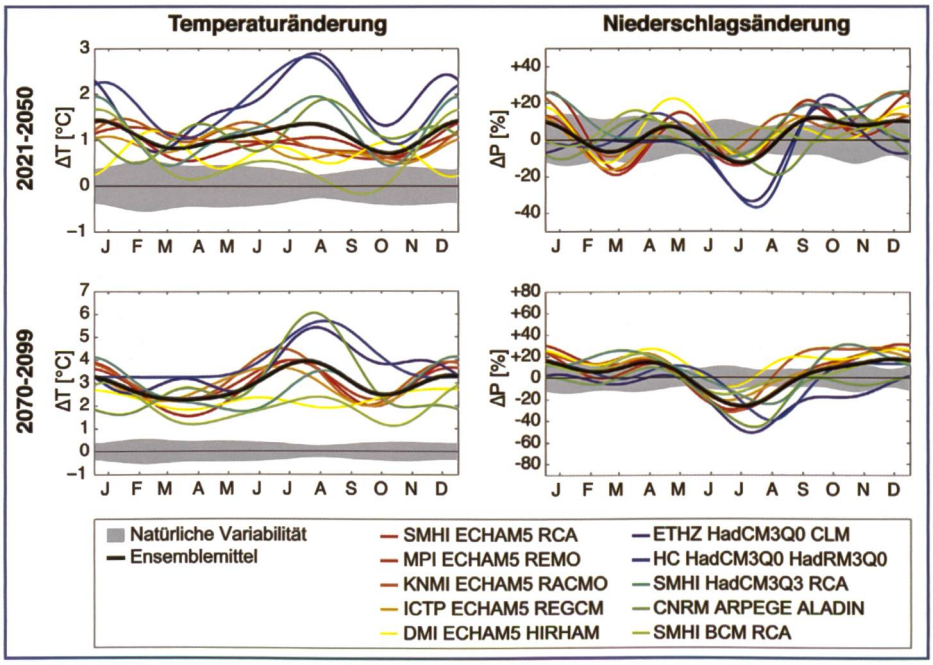

Bild 5. Jahresgänge des Klimaänderungssignals für Temperatur (linke Spalte) und Niederschlag (rechte Spalte) an der Station Bern/Zollikofen. Die frühe Szenarioperiode ist in der oberen Zeile, die spätere Periode in der unteren Zeile dargestellt. Die Namensgebung der GCM-RCM-Ketten folgt dem Schema Institution, an der die Simulation durchgeführt wurde – GCM – RCM (siehe Tabelle 1). Die Bandbreite der natürlichen Variabilität entspricht der Standardabweichung geresampelter Beobachtungszeitreihen. Grafik angepasst von Bosshard et al., 2011.

3.2 Statistisches Post-Processing

Das statistische Post-Processing bildet die Schnittstelle zwischen den RCMs und den hydrologischen Modellen. Dabei wird einerseits die räumliche Auflösung erhöht, andererseits werden die Modellfehler der GCM-RCMs korrigiert. Für die vorliegende Studie wurde dafür die Delta Change Methode verwendet (Gleick, 1986; Bosshard et al., 2011). In dieser Methode werden beobachtete meteorologische Zeitreihen X in einer Kontrollperiode mit dem aus Klimamodellen abgeleiteten Klimaänderungssignal ΔX skaliert. Zur Kalibration hydrologischer Modelle werden meistens meteorologische Stationsdaten verwendet. Deshalb wurden alle GCM-RCM-Daten mittels inverser Distanzgewichtung auf die Stationsstandorte interpoliert, bevor daraus die Klimaänderungssignale ΔX berechnet wurden. Für T wurde eine additive, für P eine multiplikative Skalierung gemäss:

$$\Delta T = \overline{T}_{SCE} - \overline{T}_{CTL}, \qquad T^{*}_{SCE} = T^{OBS}_{CTL} + \Delta T \tag{1}$$

$$\Delta P = \frac{\overline{P}_{SCE}}{\overline{P}_{CTL}}, \qquad P^{*}_{SCE} = P^{OBS}_{CTL} \cdot \Delta P \tag{2}$$

angewendet. Dabei bedeuten die Überstriche die Mittelung über die Bezugsperiode (CTL: 1980–2009, SCE: 2021–2050 und 2070–2099). Beobachtete Daten sind mit dem Superskript OBS bezeichnet, die mittels Delta Change Methode generierten Klimaszenarien mit dem Superskript *. Die hier verwendete Methode wurde hinsichtlich der kontinuierlichen Abbildung des Jahresganges des Klimaänderungssignals, d. h. der saisonalen Veränderung von Temperatur und Niederschlag, optimiert (siehe dazu Bosshard et al., 2011). Die Werte für ΔX variieren deshalb mit dem Tag im Jahresgang.

Die so erstellten Klimaszenarien

- sind verfügbar für die Variabeln T und P,
- beziehen sich auf die Szenarioperioden 2021–2050 und 2070–2099 relativ zu 1980–2009,
- werden an Stationsstandorten in der Schweiz abgegeben,
- sind optimiert für die Abbildung der saisonalen Veränderung,
- ermöglichen durch 10 verschiedene GCM-RCM Ketten eine Abschätzung der Modellunsicherheit,
- weisen keine Veränderung der Tag-zu-Tag-Variabilität (z. B. der Regen-

tagfrequenz) und der interannuellen Variabilität auf, und
- berücksichtigen nur das Emissionsszenario A1B.

4. Resultate

Das Klimaänderungssignal ist die zentrale Grösse in der Delta Change Methode. Im Folgenden wird zunächst das grossräumige europäische Muster der Niederschlagsänderung gezeigt. Danach folgen Beispiele der ermittelten Kimaänderungssignale an einem Stationsstandort sowie das räumliche Muster der Veränderung der Jahresmittel von T und P in der Schweiz.

4.1 Grossräumiges Muster des Klimaänderungssignals

Die grossräumige Verteilung der saisonalen Niederschlagsänderung *(Bild 4)* zeigt einen Nord-Süd-Gradienten mit einer Abnahme im Süden und Zunahme im Norden. Die Grenze zwischen Zu- und Abnahme verschiebt sich dabei im Verlaufe des Jahres. Im Winter liegt sie leicht südlich, im Sommer deutlich nördlich der Schweiz. Dieses räumliche Muster tritt in der grossen Mehrheit der GCM-RCMs zu Tage.

4.2 Jahresgänge des Klimaänderungssignals

Werden die Klimaänderungssignale nun lokal für eine Station in der Schweiz ausgewertet, so ergibt sich ein Muster wie in *Bild 5*, das beispielhaft für die Station Bern/Zollikofen (BER) die Jahresgänge der Klimaänderungssignale von T und P zeigt. An dieser Station werden für beide Szenarioperioden die grössten Temperaturzunahmen im Sommer und im Winter projiziert. Die Bandbreite der Modellunsicherheit, dargestellt durch die einzelnen GCM-RCM Ketten, ist im Sommer am Grössten. Trotz der grossen Unsicherheit liegen die projizierten Veränderungen deutlich ausserhalb des Bereiches der natürlichen Variabilität, deren Standardabweichung als graues Band in *Bild 5* dargestellt ist. Für den Niederschlag ist in der Periode 2021–2050 noch kein deutliches Signal ersichtlich. In der Periode 2070–2099 zeigt sich eine Tendenz zu einer deutlichen Abnahme im Sommer sowie einer leichten Zunahme im restlichen Jahr. Das deutlichere Signal im Sommer ist eine direkte Folge des grossräumigen Musters (siehe *Bild 4*).

4.3 Räumliche Muster in der Schweiz

Bild 6 zeigt das räumliche Muster der projizierten Veränderung des Ensemblemittels aller 10 GCM-RCMs, ausgewertet an Stationsstandorten in der Schweiz.

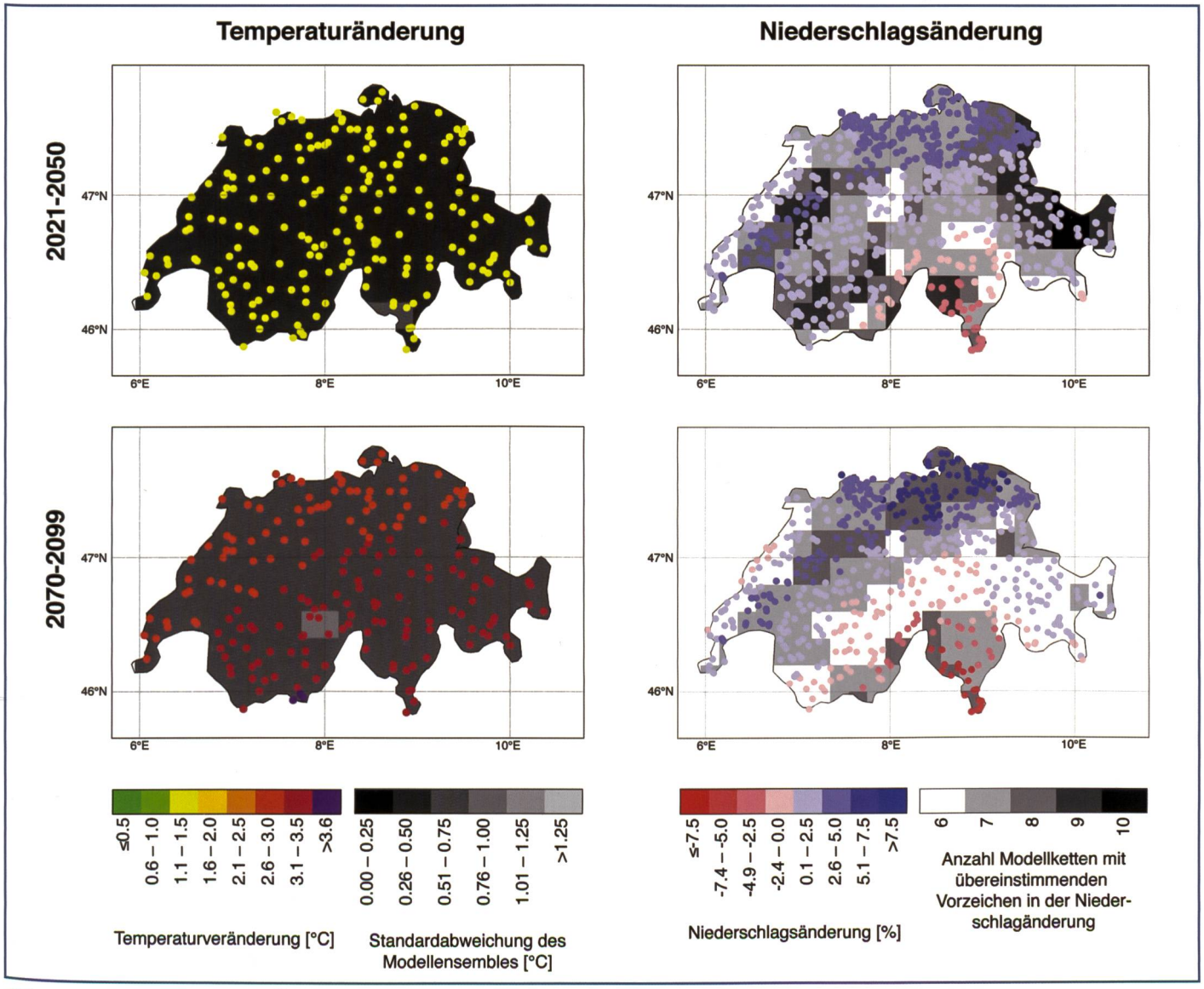

Bild 6. Räumliche Muster der Änderung der Jahresmittel der Temperatur (links) und des Niederschlags (rechts), wie sie vom Ensemblemittel projiziert werden. Die frühe Szenarioperiode ist in der oberen, die späte in der unteren Zeile dargestellt. Die graue Schattierung im Hintergrund ist ein Mass für die Übereinstimmung der 10 GCM-RCM-Ketten. Je dunkler die Schattierung, desto kleiner ist die Standardabweichung im Ensemble (Temperatur), oder desto mehr Ketten sind sich einig hinsichtlich des Vorzeichens der Änderung (Niederschlag).

Dargestellt sind die Veränderungen der mittleren Jahrestemperatur und des mittleren Jahresniederschlags. Die Temperaturzunahme weist ein homogenes Muster auf mit grössten Zunahmen über dem Alpenbogen. Die Standardabweichung des Ensembles (siehe graue Schattierung in *Bild 6*) zeigt zudem, dass die Zunahmen grösser sind als die Modellunsicherheit. Das Muster der Niederschlagsänderung ist heterogen mit einer Abnahme in südlichen und einer Zunahme in nördlichen Teilen der Schweiz. Die Veränderungen im Jahresmittel bewegen sich im Bereich von ±7.5% für 2070–2099, aber die Modelle sind sich uneinig bezüglich des Vorzeichens der Niederschlagsänderung (siehe graue Schattierung). Ein Vergleich mit *Bild 5* zeigt zudem, dass sich die Niederschlagsveränderung vor allem in einer saisonalen Verschiebung und weniger in einer Änderung des Jahresniederschlags manifestiert. So ist in den meisten Regionen der Schweiz bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit einer deutlichen Abnahme der Sommerniederschläge gegenüber keinen Veränderungen bzw. leichten Zunahmen in den restlichen Jahreszeiten zu rechnen.

5. Schlussfolgerungen

Die im Rahmen der vorliegenden Studie erstellten Klimaszenarien für Stationsstandorte in der Schweiz legen nahe, dass wir uns in den kommenden Dekaden auf zum Teils gravierende klimatische Veränderungen einzustellen haben. Hierzu zählen eine deutliche Erwärmung in der ganzen Schweiz und in allen Jahreszeiten sowie ein Rückgang der sommerlichen Niederschlagsmengen. Diese generellen Aussagen sind trotz aller Modellunsicherheiten relativ robust und belastbar. Die saisonale Veränderung des Niederschlags folgt einem grossräumigen Muster, welches konsistent von der überwiegenden Mehrheit der ENSEMBLES GCM-RCMs projiziert wird. Grosse Unsicherheiten bestehen hingegen hinsichtlich der genauen Grössenordnung der projizierten Änderungen von Temperatur und Niederschlag. Diese hängt z.T. stark von der jeweils betrachteten Modellkette ab.

Die vorgestellten Szenarien basieren auf aktuellen Ergebnissen des ENSEMBLES-Projektes. Sie sind Teil der neuen CH2011 Szenarien und können via Webseite www.ch2011.ch bezogen werden. Für einen Vergleich der aktuellen Szenarien mit den älteren Ergebnissen des OcCC Berichtes (OcCC und ProClim, 2007) sei auf den CH2011-Bericht Szenarien zur Klimaänderung in der Schweiz CH2011 (Kap. 6.2; CH2011, 2011) verwiesen.

Für die Anwendung der neuen Szenarien ist die Kenntnis ihrer Stärken und Limitierungen von grosser Bedeutung:

1) Berücksichtigte Unsicherheitsquellen

Durch die Berücksichtigung verschiedener GCM-RCM-Modellketten ermöglichen die Szenarien eine Abschätzung der Unsicherheiten, welche von den Klimamodellen verursacht wird. Die Unsicherheiten aufgrund unterschiedlicher Emissionsszenarien können jedoch nicht abgeschätzt werden, da alle Simulationen dasselbe Emissionsszenario A1B verwenden. Zur Abschätzung des Einflusses der Wahl des Emissionsszenarios auf die Ergebnisse verweisen wir auf die probabilistischen Szenarien des CH2011-Berichtes (CH2011, 2011), die zusätzlich zu A1B noch zwei weitere Emissionsszenarien betrachten. Auch die Unsicherheit aufgrund der natürlichen Variabilität kann mit den vorliegenden Szenarien nicht direkt abgeschätzt werden.

2) Variabilitätsveränderung

Die hier vorgestellten Resultate zeigen, dass insbesondere für den Niederschlag die saisonalen Veränderungen wesentlich stärker ausgeprägt sind als die Veränderung der Jahresmittel. Die vorliegenden Szenarien bilden den Jahresgang der Veränderung kontinuierlich ab und berücksichtigen demzufolge die Variabilitätsveränderung auf der saisonalen Skala. Die Szenarien berücksichtigen hingegen keine Veränderungen der interannuellen und Tag-zu-Tag-Variabilität.

Die Frage nach den Auswirkungen der projizierten klimatischen Veränderungen auf den Wasserhaushalt war Gegenstand der Projekte Klimaänderung und Wasserkraftnutzung und CCHydro. Ausgewählte Resultate des ersten Projektes werden in dieser Ausgabe vorgestellt. Weitere Studien werden folgen. Die neuen Klimaszenarien CH2011 bieten dafür eine geeignete Grundlage.

Danksagung

Wir bedanken uns bei swisselectric research, dem Bundesamt für Energie, dem Kanton Wallis und Forces Motrices Valaisannes für die Finanzierung dieser Arbeit. Die verwendeten ENSEMBLES-Daten stammen aus dem EU FP6 Projekt ENSEMBLES (Vertragsnummer 505539), dessen Unterstützung wir hier verdanken möchten. Der MeteoSchweiz wird für die Bereitstellung von Beobachtungsdaten gedankt. Ebenso möchten wir uns beim Center for Climate Systems Modelling (C2SM) für dessen technische Unterstützung bedanken.

Literatur

Bosshard, T., Kotlarski, S., Ewen, T., Schär, C. (2011): Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 2777–2788, doi:10.5194/hess-15-2777–2011.

CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp.

Christensen, JH., Christensen, OB. (2007): A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. Climatic Change, 81, 7–30.

Gleick, P. H. (1986): Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. Journal of Hydrology, 88, 97–116.

IPCC (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.

Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davi, G., de Vries B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Yong Jung, T., Kram, T., Lebre La Rovere, E., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A, Rogner, H-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., Dadi, Z. (2000): Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 599 pp.

OcCC and ProClim (2007): Climate change and Switzerland 2050: Expected Impacts on Environment, Society and Economy, Berne, Switzerland, 168 pp.

Suklitsch, M., Gobiet, A., Truhetz, H., Awan, NK., Göttel, H., Jacob, D. (2011): Error characteristics of high resolution regional climate models over the Alpine area. Climate Dynamics, 37, 377–390.

Van der Linden, P., Mitchell, JFB. (2009): ENSEMBLES: Climate change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 160 pp.

Anschrift der Verfasser

Thomas Bosshard, Sven Kotlarski, Christoph Schär, Institut für Atmosphäre und Klima (IAC), ETH Zürich, Universitätsstrasse 16, CH-8092 Zürich, Tel. +41 (0)44 632 78 18
thomas.bosshard@env.ethz.ch